

УДК 621.91

В.В. Драгобецкий, д-р техн. наук, Е.А. Наумова,
А.А. Симонова, канд. техн. наук, Кременчуг, Украина

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЗРЫВНОГО ПЛАКИРОВАНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ

Визначено параметри стійкого вибухового плакування поверхонь деталі покриттями і плівками товщиною 200–300 нм і графітових покриттів і плівок товщиною 10–100 нм. Апробована технологія модифікуючого впливу вибухового навантаження та отримання монолітних крайок тришарових сферичних днищ.

Определены параметры устойчивого взрывного плакирования поверхностей деталей покрытиями и пленками толщиной 200–300 нм и графитовых покрытий и пленок толщиной 10–100 нм. Апробирована технология модифицирующего воздействия взрывной нагрузки и получения монолитных кромок трехслойных сферических днищ.

V.V. DRAGOBECKIJ, E.A. NAUMOVA, A.A. SIMONOVA
NEW TECHNOLOGIES EXPLOSIVE CLADDING AND HARDENINGS

The parameters of sustained explosive cladding surfaces of the parts coatings and film thickness of 200–300 nm, and graphite coatings and film thickness of 10–100 nm are indentified. The technology of modifying effects of the explosive load and get solid edge sandwich spherical bottoms are tasted.

Вступлення. В результате силового воздействия, образующегося при взрыве, в материале заготовки возникают возмущения различной природы, которые приводят к фазовым превращениям, необратимым пластическим деформациям, обратимому увеличению объема материала под действием теплоты, выделяемой при ударном сжатии, образованию соединений и разрушений. При различных схемах импульсного воздействия может быть достигнуто заданное формообразование, упрочнение, соединение, дробление и нарушение сплошности.

Характер и интенсивность импульсного воздействия на заготовку даже в одном процессе могут существенно различаться и открывают возможности для изменения геометрических, механических, физических и др. свойств.

Высокие энергетические параметры и импульсный характер взрывного нагружения в своем элементарном приложении чрезвычайно многогранны и многообразны, и не все его аспекты изучены. В процессах гидровзрывной штамповки помимо необходимого формоизменения достигается значительное упрочнение обрабатываемой заготовки, а в ряде случаев происходит и сварка обрабатываемой заготовки с матрицей. Процесс сварки взрывом также сопровождается упрочнением, пластической деформацией и формоизменением. В процессе взрывного прессования помимо сварки трением, возникающей при адиабатических сжатиях частиц и их жидкофазного спекания, происходят и микропроцессы сварки взрывом частиц.

При выборе и обосновании процессов обработки для конкретных условий производства, возможно, энергетически оптимальным является тот процесс, который при прочих равных условиях обеспечивает наименьшие затраты энергии, необходимой для получения заданных физико-механических свойств изделий с требуемыми эксплуатационными свойствами.

Для выявления принципиально новых процессов взрывной металлообработки необходимо перейти к рассмотрению процессов, использующих высокоэнергетические источники энергии и явлений, сопровождающих процесс воздействия взрыва на обрабатываемый материал.

Цель работы. Анализ многофакторности физических явлений, сопровождающих процессы силового воздействия взрыва для разработки новых процессов металлообработки: взрывного нанесения пленочных покрытий; сверхбыстрой кристаллизации; упрочнения и модификации поверхностного слоя заготовки; взрывного плакирования контактных поверхностей деталей сложной конфигурации.

Материал и результаты исследований. Ударно-волновой характер взрывного нагружения обуславливает ряд физических явлений не присущих статическому нагружению: возникновение высоких температур на фронте мощной ударной волны с образованием высокотемпературных фаз, полиморфных превращений, измельчение зерен и образование двойниковых дефектов; образование кумулятивных струй; «множественный» откол при воздействии ударных волн высокой амплитуды; спекание, разрушение, деформация и сварка. Эти физические явления могут найти применение в технологиях: 1) быстрой кристаллизации; 2) получения аморфных материалов; 3) модифицирующего воздействия ударных волн; 4) получения тонких и пленочных покрытий; 5) плакирования, упрочнения и сварки. Большие возможности для создания новых технологий взрывной обработки содержат процессы, параметры которых соответствуют граничным характерным для каждого из процессов.

В последние годы интерес проявляют к методу быстрой кристаллизации, суть которого заключается в охлаждении расплавленного металла со скоростью порядка одного миллиона градусов в секунду. Быстро охлажденные сплавы сравнительно гомогенны, поскольку для образования и роста больших зерен не хватает времени [1]. Материалы с гомогенной структурой прочны и имеют высокие температуры плавления. Быстрая кристаллизация может вызывать образование метастабильных фаз. Метастабильные фазы обладают рядом нетривиальных свойств. Например, быстрокристаллизующиеся алюминиевые сплавы имеют удельную прочность, равную или превышающую прочность титановых сплавов при умеренных и высоких температурах. Они также необычайно коррозионностойки. Быстроохлажденные алюминиевые сплавы способны заменить титан в деталях компрессоров газотурбинных

двигателей, чугун в тормозных дисках автомобильных колес, чугунные корпуса бункеров железнодорожных вагонов и т.д.

Для осуществления процесса динамической закалки с использованием взрывчатых веществ, необходимо порошок или упрочняемую деталь разогнать зарядом взрывчатого вещества до соударения с охлажденной поверхностью жидкости или металла. При соударении метаемого тела со скоростью порядка 2,5-3 тыс. м/с происходит быстрое охлаждение и ударно-волновое сжатие с образованием метастабильных фаз.

Процесс осуществляется следующим образом. В полости, образованной в высокопрочном сплаве, располагаются взрывчатое вещество и метаемую среду. При взрыве заряда метаемая среда разгоняется, и при соударении с охлаждаемой поверхностью происходят процессы, характерные для быстрой кристаллизации.

Максимальное давление, возникающее при соударении метаемой среды с твердой поверхностью, можно оценить по формуле [2]

$$p = \rho_o C_o v (1 + k \frac{v}{C_o}) \quad (1)$$

где ρ_o , C_o – плотность метаемой среды и скорость звука в ней; v – скорость частиц метаемой среды; k – постоянная, характеризующая увеличение скорости волны при ударном сжатии.

Давление, необходимое для образования метастабильной фазы, соответствует сотням килобар и достижимо при скоростях соударения, превышающих в несколько раз скорость звука в воздухе. Достигнуть этого можно при использовании импульсных источников энергии. Задача о метании тел продуктами взрыва в упрощенной постановке решена в работе [3]. Скорость v_i метаемого тела составит

$$V_i = D = \left[\frac{3r}{(k^2 - 1)(3 + r)} \right]^{0.5}. \quad (2)$$

Здесь k – показатель продуктов взрыва; D – скорость детонации;

$$r = \frac{\rho_o \delta_o}{\rho_i \delta_i},$$

где ρ_o, ρ_i – плотности взрывчатого вещества и метаемого тела; δ_o, δ_i – протяжности взрывчатого вещества и метаемого тела. В зависимости от вида взрывчатого вещества и соотношения масс взрывчатого вещества и метаемого тела скорость V_i достигает 2500 м/с.

Ряд процессов взрывной металлообработки (резка, сварка) связан с образованием кумулятивных струй в обрабатываемых материалах. Это явление можно использовать для получения аморфных материалов. Известно, что скорость падения температуры при соударении метаемого тела с поверхностью другого материала при скоростях соударения порядка 1000 мс^{-1} в интер-

вале температур 700-350° составляет до $3,5 \cdot 10^6$ град/с [3]. При таких градиентах температур происходит получение аморфных материалов из расплавов. Такие параметры соударения характерны для процессов сварки взрывом, и ряд исследователей, изучающих структуры зоны соединения сваренных взрывом заготовок, обнаружили в сварном шве включения аморфного металла [3]. Видимо, образование аморфных структур происходит из расплавленного металла. Т.е. соударение метаемого тела с подложкой должно приводить к расплавлению зоны контакта, подверженного обработке материала. На некоторых режимах сварки взрывом в зонах, прилегающих к сварному шву, образуются литые включения. Последние снижают качество и прочность сварного соединения и крайне нежелательны. Для образования слоя из аморфного материала или обладающего большим количеством аморфных составляющих режимы соударения должны обеспечить расплавление приконтактных слоев и высокую скорость охлаждения. Количество литых включений увеличивается по мере увеличения скорости детонации D , а следовательно, и скорости точки контакта. Предельное значение скорости точки контакта принимаем в пределах зоны волнообразования [3]. Величина сварочного зазора h и параметр сварки r соответствует максимальной скорости соударения. Как правило, при таких режимах сварки не происходит, а образуется псевдоаморфный слой, обладающий рядом уникальных свойств. Таким образом, на стыке процессов сварки взрывом и взрывного упрочнения для ряда материалов возможен процесс быстрой кристаллизации. И этот процесс, вероятно, дает возможность получения монометаллов с поверхностной структурой и свойствами, характерными для биметаллов. Интенсифицировать и стабилизировать процесс нанесения покрытий с псевдоаморфной структурой возможно путем придания упрочняемой поверхности подложки рельефа, обеспечивающего образование встречных кумулятивных струй из расплавленного металла и окислов. Например, рельеф может быть треугольного (рис.1), трапециидального и др. профилей. При соударении струй образуется мелкодисперсная пелена и распыл струй на массивное тело подложки. В таких условиях скорость охлаждения компонент кумулятивных струй достигает 10^6 градусов в секунду, и создаются условия для быстрой кристаллизации.

Использование эффекта множественного откола в методах взрывной обработки открывают новые возможности в области получения тонких и пленочных покрытий толщиной порядка 100 nm и менее.

Покрытия, полученные в процессе совместной пластической деформации при сварке взрывом, по своей прочности сцепления с подложкой превосходят все существующие методы плакирования. Это дает возможность использовать полученные таким образом детали с защитными покрытиями в условиях динамического нагружения. Кроме того, покрытия обладают коррозионной стойкостью, антифрикционностью, гидростойкостью, теплопроводностью, износостойкостью.

Определенные трудности возникают при нанесении покрытий толщиной менее 1 мм. В этом случае происходит деформация, коробление, разрывы и т.д. плакирующего слоя, но и что особенно существенно, потребный заряд взрывчатого вещества по своей геометрии меньше критического диаметра детонации. Для решения проблемы сварки используют дополнительные пластины – спутники, к которым приклеивают фольгу из плакирующего материала. Как правило, после сварки из-за наличия волн растяжения происходит отрыв пластины спутника. Качество плакирующего слоя определяется технологией склеивания. Кроме склеивания покрытие на пластину – спутник можно наносить любым другим методом напыления, химическим и т.д. При соударении с подложкой происходит перенос материала покрытия на последнюю. Прочность сцепления при этом превосходит исходную с пластиной – спутником. Для получения покрытий из графита, а также графитовых пленок на пластину-спутник покрытие может наноситься графитовым стержнем натиранием. Для получения пленок, необходимо растворить подложку.

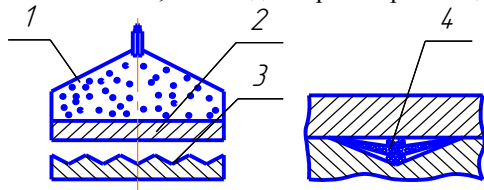


Рисунок 1 – Схема упрочнения с образованием куммулятивных струй: 1 – взрывчатое вещество; 2 – ударник; 3 – упрочняемое изделие подложки; 4 – струя

Следующим направлением формирования тонких металлических покрытий является сварка взрывом порошков с монолитными металлами.

Для нанесения порошков на металлы ударными волнами применяют схемы, аналогичные одностороннему прессованию [2]. Процесс метания пористого (или сыпучего) слоя, как правило, при теоретическом анализе разбивают на два этапа. Считается, что на первом этапе разгон происходит в ударной волне, сильно уплотняющей вещество, переводя его в близкое к компактному состоянию. На втором этапе продукты детонации далее ускоряют спрессованный пористый слой. Между взрывчатым веществом и порошком используют защитный слой. Нанесение порошковых покрытий на металлической основе ударно-волновой обработкой производится как в твердом, так и жидком состоянии. Смена механизма формирования слоев от твердого к жидкофазному определяется значениями скорости соударения порошка с подложкой и скоростью скольжения ударной волны вдоль подложки. Для процесса в твердой фазе слой покрытия состоит из спрессованных, деформированных и сваренных между собой частиц исходного порошка, а прочность его сцепления близка к прочности монолита. Соударение порошка со скоростью, превышающей критическую, приводит к образованию слоев из жидкой фазы

с формированием литых структур и прочностью сцепления на уровне монолита. Толщина слоев может достигать 10–100 nm.

Монолитная металлическая подложка при импульсной обработке остается холодной. Жидкофазное формирование поверхностных слоев можно рассматривать как динамическую закалку из жидкого состояния. Данному методу присущ ряд особенностей: плавление порошкового материала происходит с высокой скоростью нагрева, что позволяет избежать выгорания и окисления элементов при обработке высоколегированных и порошковых смесей; высокая скорость физикохимических реакций в ударном фронте позволяет получать слои из метастабильных фаз или пересыщенных растворов и соединений из смесей порошков непосредственно за время обработки; перевод металла порошка в расплавленное состояние и его охлаждение со скоростью порядка 1 млн. градусов в секунду создает условия для быстрой кристаллизации.

В процессе сварки взрывом на режимах $r < r_{min}$ и $r > r_{max}$ (r – параметр сварки) соединения свариваемых материалов не происходит, но тем не менее, на соударяющихся поверхностях образуется тонкий металлический слой. При $r < r_{min}$ основной механизм образования покрытия связан с фрикционным взаимодействием соударяющихся поверхностей, а при $r > r_{max}$, когда давления в зоне контакта превышают $2\sigma_m$ (σ_m – предел текучести), наблюдается множественный откол от соударяемой поверхности метаемой пластины. В результате этого происходит соударение и сварка отколовшихся частиц металла с поверхностью подложки, затем дополнительное зачеканивание отколовших частиц в поверхность ударом плакирующей пластины и отскок последней.

Соединение не происходит и в том случае, когда полученное соединение разрушается волнами разгрузки вследствие того, что в процессе деформации металла в зоне соединения большое количество энергии переходит в тепло, и наиболее деформированные поверхности участка расплавляются, а затем затвердевают при отводе тепла в окружающий слой металла. При движении точки контакта зона высоких давлений сменяется зоной растягивающих напряжений. Когда расплавленный участок металла не успевает затвердеть, происходит разрушение зоны соединения. Зона перемешивания расплавленных при соударении металлов остается на одной из поверхностей.

Стабильное получение покрытий толщиной 10–100 nm наиболее целесообразно осуществлять при $r < r_{min}$ и активации фрикционного взаимодействия. Это достигается путем обеспечения скольжения плакирующего слоя по подложке. Для этого размещают заряд на торцевой поверхности плакирующей заготовки, либо плакирующую заготовку выполняют в виде клина.

По своей сути процесс близок процессам фрикционного латунирования, бронзирования и меднения стальных поверхностей. Цель процесса – предохранение деталей от схватывания при приработке, уменьшение износа в по-

следующей работе, такой как защитное покрытие перед сборкой. В медесодержащем слое можно возбудить избирательный перенос.

Удобно в технологическом отношении наносить покрытие, используя клеевые составы. На пластину - спутник наносится клей, например, силикатный или жидкое стекло. На клей наносится лакирующий слой порошка необходимого состава. При соударении с лакируемой поверхностью слой порошка переносится на последнюю. Затвердевший клей отлетает.

Процесс был апробирован для упрочнения алюминиевых корпусов букс железнодорожных вагонов. Была изготовлена опытная партия корпусов букс с упрочненными приливами. Один из образцов представлен на рис. 2.

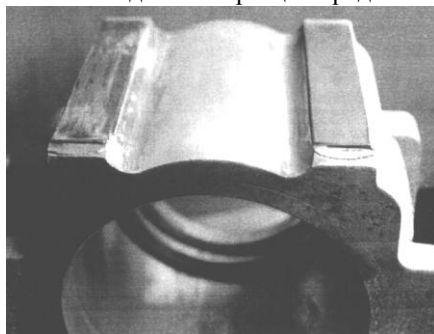


Рисунок 2 – Корпус буксы из алюминиевого сплава

При придании поверхности прилива корпуса буксы рельефа, обеспечивающего образование встречных кумулятивных струй из расплавленного алюминиево-магниевого сплава при соударении с метаемой пластиной, образуется микрослой с микротвердостью, соответствующей твердости титановых сплавов. В таких условиях скорость охлаждения встречных кумулятивных струй достигает порядка 1 млн. градусов в секунду [3], и создаются условия для протекания процесса быстрой кристаллизации.

Модифицирующее воздействие ударных волн используем для интенсификации диффузионных процессов в технологиях химико-термической обработки.

Так как диффузия совершается путем последовательного перемещения отдельных атомов, то для движения любого данного атома в твердом теле обязательно приобретение им определенной энергии активации. Установлено, что всякий фактор, способствующий увеличению исходной энергии атома, тем самым способствует уменьшению той дополнительной энергии, которая необходима для активации атома при диффузии.

Факторами, способствующие направленному потоку вещества являются градиент температуры, градиент напряжений, градиент электрического поля и т.д.

В нашем исследовании наибольший интерес представляет градиент напряжений и температуры. При прохождении ударных волн через металлы градиент напряжения составляет величину порядка сотен тысяч атмосфер на не-

сколько микронов, и очевидно, что в этом случае роль D_σ значительно возрастает. Оценка коэффициента диффузии при воздействии ударных волн связана с большими трудностями, состоящими в том, что время процесса чрезвычайно мало, и трудно выделить этот эффект в чистом виде. Прохождение ударной волны неизбежно связано с повышением температуры, изменением дефектности кристаллической структуры, действием температурного поля после разгрузки, концентрационной неоднородностью и с другими факторами.

Существенное влияние на коэффициент самодиффузии оказывает скорость деформации при пластической деформации. Увеличение скорости деформации от 10^{-4} до $2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ при температуре 750°C приводит к увеличению коэффициента в 2500 раз. Аномальное ускорение диффузии в различных сочетаниях металлов и паре железо-углерод наблюдали при импульсной деформации со скоростью 20 с^{-1} , а также при импульсной сварке со скоростью 10^2 с^{-1} . Полученные значения D для самодиффузии превосходят коэффициент диффузии железа в жидком состоянии. В диапазоне скоростей от 10^{-2} до 10^2 с^{-1} также отмечается увеличение коэффициента диффузии, связываемое с повышением средней концентрации вакансий, число которых оценивают с использованием зависимости

$$N = \frac{kl_p}{2bd}, \quad (3)$$

где $k=0,25$ – фактор, учитывающий долю образовавшихся порогов дислокаций, которые могут перемещаться конвективно; l_p – расстояние, на которое перемещается каждая дислокация; b – вектор Бюргерса; d – расстояние между дислокационными диполями на фронте ударной волны [4].

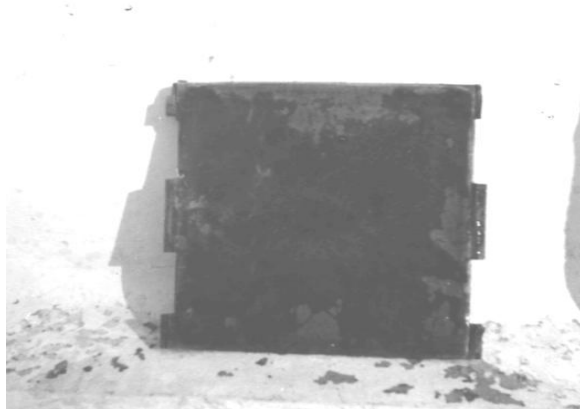


Рисунок 3 – Матрица для силикатного кирпича

Рассмотренный процесс реализован при упрочнении матриц из низколегированной стали для производства силикатного кирпича цементацией борирован-

нием (рис. 3). Предварительное их взрывное нагружение сократило время выдержки в печи в 3 раза. При этом их износостойкость увеличилась в 1,5–2 раза.

Следовательно, одной из областей применения взрывной обработки может стать модифицирующее воздействие ударных волн и скоростной деформации на материал, который в дальнейшем будет подвергнут химико-термической и др. видам обработки. После взрывного нагружения большинство металлов переходят в активированное состояние, и ряд процессов химико-термической обработки и нанесения защитных покрытий (цементация, борирование, алитирование, азотирование и др.) протекает значительно быстрее при тех же показателях качества.

Далее рассмотрим технологическую применимость явления откола. Взаимодействие падающей и отраженной ударных волн в нагружаемом материале приводит к возникновению нарастающих растягивающих напряжений, которые могут привести к разрушению, называемому отколом. На это явление больше всего влияют форма волны напряжения и предельное значение разрушающего напряжения σ_{δ} нагружаемого материала. Положение трещины откола в сплошном материале или места расслоения в слоистом зависит от формы волны напряжений. При распространении волны в материале крутизна кривой $\sigma(t)$ за фронтом волны уменьшается с увеличением толщины нагружаемого поли- или мономатериала δ , что приводит к увеличению толщины откола Δ . При распространении волны напряжений большой интенсивности $\sigma > 2\sigma_{\delta}$ возникает множественный откол – несколько следующих один за другим параллельных отколов.

В процессах взрывной обработки, не связанных с операциями дробления и разрушения, возникновение откола – нежелательное явление. Обычно для предотвращения откола отражающую поверхность материала непосредственно опирают о другое тело, поглощающее энергию [2]. Предотвращение откола производится и путем использования захватывающих плит и мастик [2]. При этом откольные элементы, поглощающие значительное количество энергии, могут быть использованы для выполнения ряда вспомогательных операций.

Полезное применение откола – это, прежде всего, разделение слоистых изделий для их утилизации после выполнения своего назначения. Для этого на наружную поверхность наносят слой взрывчатого вещества, параметры которого выбирают таким образом, чтобы разрушение произошло по поверхности раздела.

При соединении многослойных изделий между собой методами сварки плавлением большие технологические трудности возникают при расслоении пакета в результате термического нагрева электрической дугой. Желательно обеспечить монолитность кромок и плотное, без сцепления, прилегание слоев изделия. Решить эту проблему возможно следующим образом (рис. 4). Предварительно изготовленные заготовки 1 собирают в пакет и деформируют до получения заданной конфигурации днища 2. Затем производят расслоение

кромки дна 2. Для этого дно устанавливают в матрицу 3 так, чтобы кромки дна 2 выступали над плоскостью верхнего торца матрицы 3, для чего в полости матрицы устанавливают прокладку 4. После этого по наружному периметру кромки дна 2 размещают кольцевой заряд взрывчатого вещества 5 и производят его инициирование.

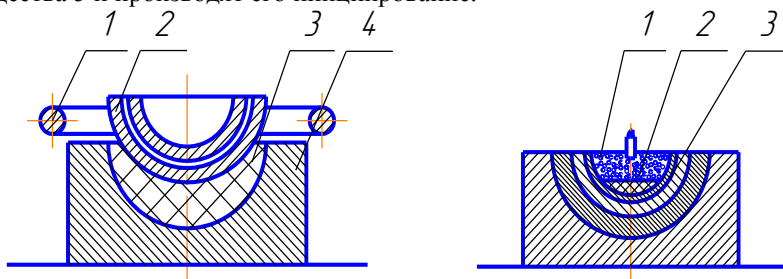


Рисунок 4 – Схема получения изделий с монолитными кромками:

1 – взрывчатое вещество; 2-слоистая заготовка; 3-прокладка; 4-матрица

Предварительно изготовленные заготовки 1 собирают в пакет и деформируют до получения заданной конфигурации дна 2. Затем производят расслоение кромок дна 2. Для этого дно устанавливают в матрицу 3 так, чтобы кромки дна 2 выступали над плоскостью верхнего торца матрицы 3, для чего в полости матрицы устанавливают прокладку 4. После этого по наружному периметру кромки дна 2 размещают кольцевой заряд взрывчатого вещества 5 и производят его инициирование.

В результате действия взрыва происходит расслоение слоев многослойного дна 2 у его кромок. После этого многослойное дно устанавливают в матрицу 3 и производят сварку взрывом кромок дна с калибровкой и уплотнением слоев.

Таким образом, эффект откола находит применение как функциональный и интенсифицирующий фактор и связан с обработкой и созданием слоистых изделий и использованием слоистости, как конструктивного, так и технологического приемов. Этот метод нашел применение при изготовлении слоистых сосудов высокого давления (рис. 5).

Сам процесс сварки взрывом может найти применение не только для плакирования пластин и цилиндрических оболочек, но и для плакирования и упрочнения поверхностей деталей сложной конфигурации.

В связи с развитием производства специальных профилей, получаемых методом экструзии, появилась возможность изготовления корпусов букс железнодорожных вагонов из алюминиевых сплавов, повышенная коррозионная стойкость которых позволяет исключить затраты на антикоррозионную обработку, сократить ремонты из-за коррозии, снизить массу ходовых частей вагонов на 20-30 %.

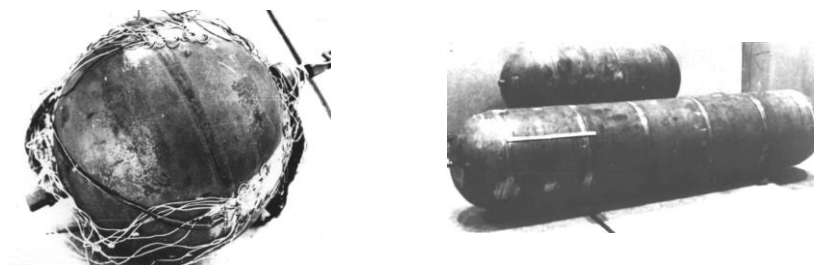


Рисунок 5 – Сосуды высокого давления

Выводы: 1. Изучение и оценка многофакторности физических явлений, сопровождающих процесс силового воздействия взрыва, позволили разработать принципиально новые процессы нанесения тонких металлических покрытий, сверхбыстрой кристаллизации, динамической закалки и диффузионного насыщения поверхностного слоя.

2. Технология нанесения тонких металлических покрытий толщиной менее 0,5 мм (ограничения на процесс сварки взрывом) позволяет получать биметаллические соединения с прочностью сцепления равной или превышающей прочность подложки.

3. Модифицирующее воздействию ударных волн перед химико-термической обработкой, позволяет сократить время процесса цементации в 1, 5...2 раза.

4. Процессы сверхбыстрой кристаллизации позволяют получать сверхтвердые порошковые материалы, применение которых позволяет в 3...4 раза повысить твердость поверхностного слоя изделия.

5. Разработана технология взрывного упрочнения опорных поверхностей алюминиевых букс.

Список использованных источников: 1. Materials Science and Engineering – It Past and Its Future. M.C.Flemings in Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 26, No. 2, pages 93–100; 1986. 2. Palmour H., Lains W.D., Springs R.M. Recent trends in indestanding dynamic Compaction of powders // Internat.: Round Table Conference ondientering 5 / Proclodings of / Amstodam. Partoroz. – 1982. C.611–618. 3. Crossland A.B., Braithwaite B.M., Chapman H.E. Explosive Plugging Development of Nuclear Heat Exchangers // Welding and Fabrication in the Nuclear Industry. London. 1979. P. 297–303. 4. Schwars A. Theory for the Shock – Wave Consolidation of Powders // Acta Met. 1984. V. 32. № 8. P. 1243 – 1252.

Поступила в редколлегию 15.04.2011

Bibliography (transliterated): 1. Materials Science and Engineering – It Past and Its Future. M.C.Flemings in Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 26, No. 2, pages 93100; 1986. 2. Palmour H., Lains W.D., Springs R.M. Recent trends in indestanding dynamic Compaction of powders // Internat.: Round Table Conference ondientering 5 / Proclodings of / Amstodam. Partoroz. – 1982. C.611618. 3. Crossland A.B., Braithwaite B.M., Chapman H.E. Explosive Plugging Development of Nuclear Heat Exchangers // Welding and Fabrication in the Nuclear Industry. London. 1979. P. 297303. 4. Schwars A. Theory for the Shock Wave Consolidation of Powders // Acta Met. 1984. V. 32. № 8. P. 1243 1252.